УДК 62-781 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

Оценка свойств антикоррозионных покрытий металлоконструкций

В. В. Дерюшев, М. М. Зайцева, Е. Е. Косенко, С. К. Мамбергер
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. От воздействия окружающей среды зависят свойства объекта с металлоконструкциями и безопасность его использования. Этим обусловлена актуальность проблемы универсальности антикоррозионных покрытий.
Постановка задачи. Основная цель исследования — поиск нового подхода к выбору наиболее рациональных средств защиты металлоконструкции от коррозии на основе экспериментальных данных. При этом учитывается возможность получения нечеткой информации по различным критериям оценивания.
Теоретическая часть. Основные задачи исследования: формирование и обоснование необходимости применения концепции (аксиомы) достаточности; анализ качества антикоррозионных материалов; построение показателя для оценивания (анализа) качества объектов; оценка (анализ) качества антикоррозионной стойкости в соответствии с концепцией достаточности.
Выводы. Оригинальный подход к задаче выбора наиболее рациональных средств защиты металлоконструкции от коррозии основан на экспериментальных данных. Рассмотренная общая методология может быть использована для отбора критериев оценивания безопасности эксплуатации металлоконструкций, так как опирается на апробированные методы принятия решений.

Ключевые слова: безопасность эксплуатации, минимизация риска, неопределенность, теория принятия решений, антикоррозионные покрытия.

Для цитирования: Оценка свойств антикоррозионных покрытий металлоконструкций / В. В. Дерюшев, М. М. Зайцева, Е. Е. Косенко, С. К. Мамбергер // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 4. — С. 24‒29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

Evaluation of the properties of anti-corrosion coatings of steel structures

V. V. Deryushev, M. M. Zaytseva, E. E. Kosenko, S. K. Mamberger
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The properties of an object with metal structures and the safety of its use depend on the environmental impact. This explains the urgency of the problem of universality of anticorrosive coatings.
Problem Statement. The main goal of the study is to find a new approach to choosing the most rational means of protecting metal structures from corrosion based on experimental data. This takes into account the possibility of obtaining fuzzy information on various evaluation criteria.
Theoretical Part. The main objectives of the study: the formation and justification of necessity of application of concepts (axioms) of sufficiency; analysis of the quality of anti-corrosion materials; constructing a measure for assessing (analyzing) the quality of facilities; evaluation (analysis) of quality of corrosion resistance in accordance with the concept of sufficiency.
Conclusion. The original approach to the problem of choosing the most rational means of protecting metal structures from corrosion is based on experimental data. The considered general methodology can be used for selecting criteria for evaluating the safety of metal structures, since it is based on proven decision-making methods.

Keywords: operational safety, risk minimization, uncertainty, decision theory, anti-corrosion coatings.

For citation: Deryushev V. V., Zaytseva M. M., Kosenko E. E., Mamberger S. K. Evaluation of the properties of anti-corrosion coatings of steel structures: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;4:24‒29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

Введение. С точки зрения промышленной безопасности остаются актуальными вопросы управления техническим состоянием металлоконструкций. В данной работе в качестве факторов, приводящих к коррозии, рассматриваются атмосферное влияние, воды различной солености, температура и т. д. При эксплуатации металлоконструкции в неблагоприятных условиях снижаются несущая способность и уровень прочности, безопасности объекта, ухудшаются эксплуатационные качества. В этой связи актуальны задачи поиска новых подходов к защите металлоконструкций от разрушения вследствие коррозии.

Цель исследования — разработка метода поиска универсальных способов и средств антикоррозийной защиты металлических конструкций, основанного на имеющейся базе данных.

Оригинальность данного подхода заключается в том, что для анализа защитных покрытий авторы представленного исследования учитывают нечеткую информацию. Для оценки качества покрытий применяется интегральный показатель достаточности. Предполагается, что его числовое значение имеет граничную величину, превышение которой в лучшем случае не имеет смысла, а в худшем приведет к негативному изменению не учитываемых в данной работе показателей. Это утверждение примем как аксиому или концепцию достаточности.

Основные задачи исследования: формирование и обоснование необходимости применения концепции (аксиомы) достаточности; анализ качества антикоррозионных материалов; разработка модели построения показателя для оценивания (анализа) качества объектов; оценка (анализ) качества антикоррозионной стойкости в соответствии с концепцией достаточности на примере выбранных покрытий.

Постановка задачи. Металлоконструкции механических объектов эксплуатируются в различных климатических условиях. На них воздействуют температура, солнечная радиация, влажность, вода (в том числе соленая). В качестве антикоррозионных материалов предлагается рассмотреть грунтовки и два вида эмалей (противокоррозионные и покрывные). Оцененными средствами можно обрабатывать:

— чистый металл,

— конструкции с прочно держащимися защитными покрытиями,

— конструкции с остатками использованных ранее материалов.

Исследуемые покрытия обладают высокими показателями силы сцепления средства с поверхностью, антикоррозионными и эстетическими свойствами. Износостойкость антикоррозийных покрытий (АКП) можно повысить, изменив влияние параметров механического взаимодействия (с этой целью состав наносится на влажную поверхность) и теплоотражающего эффекта в инфракрасной области спектра [1–4].

Для сравнительного анализа наиболее распространенных антикоррозионных материалов лабораторно изучались их физико-механические свойства.

В рамках данного исследования рассмотрены основные показатели, определяющие уровень качества защитного антикоррозионного покрытия: сплошность, гибкость, атмосферостойкость, адгезия, толщина.

Адгезия покрытия (т. е. сила сцепления между защищаемой поверхностью (подложкой) и антикоррозионным материалом контролировалась методом решетчатого надреза.

Толщина сухого покрытия на стальных образцах контролировалась с помощью приборов МТ-30Н, «Микротест».

Сплошность, от которой зависят защитные свойства покрытий, — это количество микротрещин, приходящихся на квадратный сантиметр покрытия. Проверялась дефектоскопом ДУК-60 М.

Гибкость, позволяющая предугадывать поведение покрытий при эксплуатации, — это максимальная величина прогиба образца. При ее превышении в антикоррозионном покрытии образуется макротрещина (магистральная трещина). Это качество проверялось с помощью специальной шкалы гибкости (ШГ).

Атмосферостойкость — способность материала сохранять физико-механические характеристики под воздействием различных климатических факторов [5–8].

В некоторых случаях неочевиден учет показателей качества, включая данные об их количестве, способе измерения, значимости, с точки зрения многокритериального оценивания технического состояния. Безусловно, в перечень критериев необходимо включать те, которые освещают все существенные стороны исследуемых объектов.

В большинстве случаев оценка качества ориентируется на некие положительные характеристики объекта исследования и предполагает, что соответствующий показатель должен расти. Однако этот подход нецелесообразно использовать при оценке технического состояния. Ввод интегрального показателя обусловливается необходимостью установить границу числовой величины рассматриваемых факторов. Последствиями выхода за эту границу, предположительно, могут быть:

— нецелесообразность дальнейшего увеличения показателя,

— негативные результаты из-за изменения неучтенных показателей (то есть снижение качества защитного покрытия).

Описанный выше подход принимается как аксиома достаточности.

Теоретическая часть. Анализ (оценивание) качества проходит в пять этапов.

1. Предварительный анализ: постановка проблемы с учетом элементов, характеризующих исходное множество объектов, подлежащих оцениванию.

2. Структурный анализ: формулирование основной цели оценивания и целей последующих уровней, определение возможности их достижения.

3. Анализ неопределенности: поиск объединяющих элементов действительного технического состояния объекта и его места в одно- и многомерных пространствах факторов.

4. Анализ полезности или ценности: расстановка на числовой оси точек, отображающих некоторое множество вариантов состояния объекта. При этом каждой точке присваивается значение «лучше — хуже». Так устанавливается полезность критерия.

5. Процедура оптимизации: максимизация ожидаемой полезности, в частности поиск решения, ведущего к достижению необходимого технического состояния.

Методические подходы к построению структуры целей и разработке перечня критериев описаны в [1]. Предполагаем, что для числового оценивания не имеет значения, какой исходный массив объектов рассматривается. При этом предпочтительно в ходе оценивания выявлять лучшие с точки зрения технического состояния объекты по специальному интегральному показателю, дающему бóльшую (или меньшую) оценку с математической и методической точек зрения. Принципы выбора и оценивания объектов, основанные на их размещении внутри множества критериев, описаны в [2]. Таким образом, рассматриваемый здесь подход не единственный. Его основной элемент — правило (или принцип) оценивания π, задающий отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев.

Для пары объектов a_ν и a_μ выбор будет базироваться на следующих принципах:

— $a_\nu > a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «лучше» второго,

— $a_\nu \sim a_\mu$ — объекты равноценны,

— $a_\nu < a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «хуже» второго.

Пары объектов характеризуются векторами сравнений $S_{\nu\mu}$.

Для исследования полезен принцип обобщенного критерия и так называемые лексикографические подходы — с сильным предпочтением на множестве частных критериев. В данном варианте объекты равноценны ($a_\nu \sim a_\mu$), а их оценки соответствуют установленным минимальным величинам [4].

Рассмотрим условие

$$a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow x_i^\nu \geq d_i,\ \ x_i^\mu \geq d_i, \quad i = 1, \ldots, m, \tag{1}$$

где d_i — заданное пороговое значение (уровень достаточности); m — количество рассматриваемых показателей; $x_{i\nu}$ и $x_{i\mu}$ — оценки сравниваемых объектов (ν-го и μ-го).

Описанное условие будем рассматривать как математическую формулировку концепции достаточности и применять для оценки технического состояния. Однако прямое использование этого принципа оценивания качества ограничивает возможность его применения на практике, так как предполагает наличие отношения сильного предпочтения на множестве критериев $K = \{K_1, K_2, \ldots, K_m\}$ в виде:

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3 \geq \ldots \geq K_m. \tag{2}$$

Делаем вывод, что целесообразнее задать метризованное мультипликативное отношение линейного порядка, то есть применить обобщенный критерий.

В этом случае

$$a_\nu \succ a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\nu) > \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\mu);\ \ a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\nu) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\mu). \tag{3}$$

Здесь α_i — коэффициенты, удовлетворяющие, например, условию

$$\sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1. \tag{4}$$

В качестве монотонного оператора отображения (свертки) исходного множества оцениваемых объектов на числовую ось «лучше — хуже» можно использовать предложения авторов работ [5, 6]. В этом случае интегральным показателем будет скалярная линейная функция от исходных критериев, определяемая размытым (по Заде) отношением на парах специально задаваемых объектов.

Перейдем к модели построения показателя для оценивания (анализа) качества объектов. Задача заключается в определении компонент вектора B, подчиняющихся условию (4), и построении показателя z, аппроксимирующего объективно известную или специально задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между искусственными объектами (транспортными средствами).

$$Q = \|q_{rk}\|_{p,p}. \tag{5}$$

Принимаем p — количество рассматриваемых искусственных объектов, которым определяется размер матрицы Q; q_{rk} — элементы матрицы; r, k — искусственные объекты на числовой оси «лучше — хуже».

На оси показателя z квадрат расстояния между r-м и k-м искусственными объектами (вариантами защиты) имеет вид:

$$d_{rk}(B) = (z_r - z_k)^2 = \left[\sum_{j=1}^{m} b_j (x_{rj} - x_{kj})\right]^2, \qquad (6)$$

$$D(B) = \left\| d_{rk} \right\|_{p,p}. \qquad (7)$$

Матрица D (B) оценивается с помощью функционала

$$J(B) = \sum_{r=1}^{p-1} \sum_{k=r+1}^{p} [d_{rk}(B) - q_{rk}]^2. \qquad (8)$$

Искомым интегральным критерием является функция Z^*, если $J(B)$ минимальна и вектор B соответствует поставленным условиям. Полученный показатель применяем для оценивания технического состояния.

Приведем пример оценивания (анализа) качества антикоррозионной стойкости объектов.

АКП обработанной конструкции будет «лучшим» при максимальном уровне достаточности. Главная задача — распределение весовых коэффициентов, то есть придание степени значимости каждому показателю по сравнению с другими [9, 10].

Предлагается следующий вариант показателей моделирования для формирования оценки достаточности свойств антикоррозионных средств (табл. 1).

Таблица 1

Показатели моделирования для оценки достаточности свойств антикоррозионных средств

Антикоррозионное покрытие		Значение показателей			Единица измерения
Параметр	Свойство	min, y_{0j}	max, y_{Mj}	достаточное, y_{tj}	
y_1, σ	Адгезия	10^{-2}	2	0,3	МПа
y_2, H	Толщина	1	100	30	мкм
y_3, S	Сплошность	0,2	50	20	1/см^2
y_4, h	Гибкость	1	5	3	мм
y_7	Атмосферостойкость	0,03	3	1,0	год

Для оценки антикоррозионных материалов моделировались показатели, характеризующие адгезию покрытия, его толщину, сплошность, гибкость и атмосферостойкость. Минимальное, максимальное и достаточное значения показателей берутся из базы, в которую вносятся данные, полученные при обслуживании и ремонте реальных объектов. Количество объектов и показателей, характеризующих параметры АКП, может увеличиваться и уменьшаться.

Вычислим уровень достаточности z_i и определим наилучшее из анализируемых АКП путем ранжирования (табл. 2).

Таблица 2

Определение наилучших антикоррозионных покрытий

№	Наименование АКП	Показатель достаточности z_i	Место в рейтинге
1	Грунтовка ФЛ-03к	0,88	4–5
2	Грунтовка ЭФ-065	0,85	7
3	Грунтовки ВЛ-02 и ВЛ-023	0,91	2
4	Грунтовка МС-17	0,88	4–5
5	Эмаль ЭП-46У	0,87	6
6	Эмаль ХС-5226	0,9	3
7	Грунтовка Tectyl BT Coat	0,92	1

Из данных таблицы видно, что наилучшее из сравниваемых антикоррозионных покрытий — грунтовка Tectyl BT Coat (показатель достаточности — 0,92). По показателю «коррозионная стойкость» техническое состояние обработанной конструкции будет лучше с учетом адгезии покрытия, его толщины, сплошности,

гибкости и атмосферостойкости. Допустимы к использованию также грунтовки ВЛ-02 и ВЛ-023 (показатель достаточности 0,91), а также эмаль ХС-5226 (показатель достаточности 0,9).

Выводы. Разработанный метод поиска универсальных способов и средств антикоррозийной защиты металлических конструкций основан на экспериментальных данных и предполагает возможность обработки нечеткой информации. Рассмотренная методология построения критерия оценивания качества антикоррозионных покрытий может быть использована для построения требуемых критериев оценивания безопасности эксплуатации металлоконструкций, так как опирается на апробированные методы принятия решений.

Библиографический список

1. Дерюшев, В. В. Обобщенный показатель достаточности для оценивания технического состояния строительной и подъемно-транспортной техники / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 164–167.

2. Литвак, Б. Г. О разрешающей способности принципов выбора при экспертных оценках / Б. Г. Литвак // Автоматика и телемеханика. — 1991. — № 2. — С. 162–170.

3. Чернега, Ю. Г. Повышение износостойкости поверхности деталей путем нанесения вибрационных механохимических покрытий / Ю. Г. Чернега, В. В. Иванов, С. Ю. Штынь // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий. Сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 420–423.

4. Принятие технических решений в условиях неопределенности при наличии риска / В. В. Дерюшев, Е. Е. Косенко, В. В. Косенко, М. М. Зайцева // Безопасность техногенных и природных систем. — 2019. — № 2. — С. 56–61.

5. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя / В. Е. Касьянов, Д. Б. Демченко, Е. Е. Косенко, С. В. Теплякова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 1. — С. 23–31.

6. Повышение безопасности работы техники путем обеспечения ее надежности / М. М. Зайцева, Г. И. Мегера, Ф. С. Копылов, В. С. Крымский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2019. — № 2. — С. 33–37.

7. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components / A. A. Kotesova, S. V. Teplyakova, S. I. Popov, F. C. Kopylov // Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development (CATPID-2019) : International Scientific Conference in Kislovodsk 1–5 October 2019 // E3S Web of Conferences. — 2019. — Vol. 138. — P. 066029.

8. Rogovenko, T. N. Statistical modeling for risk assessment at sudden failures of construction equipment / T. N. Rogovenko, M. M. Zaitseva // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 129. — P. 05014.

9. Иванов, В. В. Исследование технологических характеристик процесса формирования вибрационного механохимического оксидного покрытия / В. В. Иванов, Р. П. Луценко, Н. П. Погорелов // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий : тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 240–245.

10. Mechanical coating formed under conditions of vibration exposure / V. Ivanov, S. Popov, N. Dontsov [et al.] // State and Prospects for the Development of Agribusiness — Interagromash 2020 : XIII International Scientific and Practical Conference // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 175. — P. 05023.

Сдана в редакцию 16.09.2020
Запланирована в номер 01.10.2020

Об авторах:

Дерюшев Виктор Владимирович, главный научный сотрудник кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1812-2834, deryushevv@mail.ru.

Зайцева Марина Михайловна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5693-1053, marincha1@rambler.ru.

Косенко Евгений Евгеньевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-9849, A123lok@mail.ru.

Мамбергер Степан Константинович, студент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9547-1523, mamberger1999@rambler.ru.

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Дерюшев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, разработка оригинального подхода к задаче выбора наиболее рациональных средств защиты металлоконструкции от коррозии на основе экспериментальных данных, подготовка текста, корректировка выводов; М. М. Зайцева — разработка модели построения показателя для оценивания (анализа) качества объектов, анализ результатов исследований, формулирование выводов исследования, корректировка текста; Е. Е. Косенко — практическое применение разработанного подхода, решение задачи оценивания (анализа) качества антикоррозионной стойкости объектов; С. К. Мамбергер — поиск примеров для практического применения результатов исследования, доработка текста, формулирование выводов.

Submitted 16.09.2020
Scheduled in the issue 01.10.2020

Authors:

Deryushev, Viktor V., Chief researcher, Department of Transport Systems and Logistics Operation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci., Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1812-2834, deryushevv@mail.ru.

Zaytseva, Marina M., Associate professor, Department of Transport Systems and Logistics Operation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5693-1053, marincha1@rambler.ru.

Kosenko, Evgeniy E., Associate professor, Department of Transport Systems and Logistics Operation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-9849, A123lok@mail.ru.

Mamberger, Stepan K., Student, Department of Transport Systems and Logistics Operation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9547-1523, mamberger1999@rambler.ru.

Contribution of the authors:

V. V. Deryushev — formulation of the main concept, goals and objectives of the research, development of an original approach to the problem of choosing the most rational means of protecting metal structures from corrosion based on experimental data, preparation of the text, correction of conclusions; M. M. Zaytseva — development of a model for constructing an indicator for evaluating (analyzing) the quality of objects, analysis of research results, formulation of research conclusions, correction of the text; E. E. Kosenko — practical application of the developed approach, solution to the problem of evaluating (analyzing) the quality of corrosion resistance of objects; S. K. Mamberger — search for examples for practical application of research results, revision of the text, formulation of conclusions.